

가변러너시스템에서 LDPE/ABS/PA6,6 수지의 충전균형

박형필¹· 차백순¹· 강중근²· 이병옥[#]

The Filling Balance of LDPE/ABS/PA6,6 Resin in Variable-Runner-System

H. P. Park, B. S. Cha, J. K. Kang, B. O. Rhee

(Received November 16, 2006)

Abstract

During the injection molding process an excessive packing can occur in the smaller volume cavity because of volumetric difference of the family-mold. It causes warpage by increased residual stress in the product and flesh by over packing. In this study, we used a variable-runner system for the filling balance of the cavities by changing the cross-sectional area of a runner, and confirmed the filling imbalance by temperature and pressure sensors. We carried out experiments to examine the influence of types of resins such as LDPE/ABS/PA6,6 on the filling balancing of the system, in order to help mold designers, who can easily adopt the variable-runner system to their design. We also examined filling imbalance in the system with CAE analysis.

Key Words : Injection Molding, Filling Imbalance, Variable-Runner System

1. 서 론

사출성형 공정 중의 충전 균형은 제품의 변형과 내부응력을 감소시키고, 균일한 수축 및 배향 등을 유도하여 제품 품질 향상에 도움을 준다. 또한 제품 성형시 발생하는 과보압 및 성형품의 플래쉬(flesh)를 방지 할 수 있기 때문에 결과적으로는 금형 수명을 연장 시킬 수 있다. 따라서, 대다수의 금형 설계자들은 충전 균형을 이루는 게이트(gate) 위치 및 게이트와 러너(runner) 크기를 CAE를 통하여 설계하고, 그 결과를 금형 제작에 반영하고 있다. 그러나 주변환경 및 성형 불량개선 시 이뤄지는 성형조건 변화(수지온도, 사출속도, 불 균일한 금형 온도 분포, etc.)와 온도 및 전단율 변화에 따른 수지의 점도 변화로 정확한 충

전 균형이 어려운 문제를 가지고 있다. 또한 금형 설계 시 적용되는 공차 및 가공오차 문제로 게이트와 러너의 정확한 가공이 어려우며, CAE 해석 결과를 금형설계에 반영할 때는, 계산된 설계치수로 가공할 수 있는 표준 공구의 부재 등의 문제도 충전 불균형의 원인으로 작용하고 있다.

충전 불균형에 관하여 Beaumont와 Young[1]은 수지 유동 중에 러너 분기점에서 발생하는 관성 효과와 러너에서의 불 균일한 온도 및 전단율 분포로 인하여 충전 불균형이 발생되며, 해결 방법으로 러너 중간에 유동 재정렬 장치를 적용하여 다수 캐비티의 충전 불균형을 해소하였으며, Jeong[2]은 러너 내에 코어핀을 채용하여 코어핀의 길이가 충전 균형에 미치는 영향에 관하여 연구 하였다.

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀
2. 아주대학교 기계공학과
교신저자: 아주대학교 기계공학과
E-mail : rhex@ajou.ac.kr

Wolbert와 Zore[3]는 가스 사출성형에 발생하는 충전 불균형에 관하여 연구하였다. 그러나 이들의 연구는 수지의 유변학적 특성 변화를 유도한 실험이기 때문에 정확한 충전 균형에는 한계를 가지고 있다. Coulter[4]는 러너에 밸브 시스템을 적용하여 수지 충전 제어 및 제품 품질 향상에 관한 연구를 하였지만, 제안된 밸브시스템이 수지 충전 중 발생하는 높은 사출압력에 견디지 못하여 밸브 시스템의 조절각도가 변화는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 성형 중의 높은 사출압력에도 안전하게 충전균형을 유지 할 수 있는 가변 러너 시스템을 이용하여 패밀리 금형에 적용하였다. 산업계에서 수요가 높은 수지 3가지(LDPE/ABS/PA6,6)에 대한 충전 균형 효과를 검증하였으며, 성형조건 변화가 캐비티 내부의 충전 균형에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 CAE를 통하여 러너 시스템의 충전 균형효과를 알아보았다.

2. 본 론

2.1 러너 내부의 플라스틱 유동

플라스틱의 점도는 온도와 전단율에 영향을 받는다. 일반적인 공정조건 상에서 증가되는 열과 전단율은 점도를 감소 시킨다. 전단박하(shear thinning)는 수지 유동 방향에 대한 유동 저항의 감소로 인하여 발생된다.

이러한 상태는 점도와 전단율에 관한 로그 그래프로 표현할 수 있다. 주로 사용되는 점도 모델은 Modified Cross-WLF Model을 사용한다[5].

$$\eta = \frac{\eta_0}{\left[1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\sigma^*}\right)^n\right]^{(1-n)}} \quad (1)$$

여기서, 점도에 대한 온도 효과는 온도의 함수로써 기준 점도 η_0 의 계산을 통하여 설명할 수 있다[5].

$$\eta_0 = Ae^{c/T} \quad (2)$$

또한, 점도에 대한 온도 효과는 WLF 식을 이용한 온도 민감도 지수(T_b)를 통하여 평가할 수 있다[5].

$$T_b = \frac{A_1(A_2 + D_1)T^2}{[A_2 + (T - D_2)]^2} \quad (3)$$

러너 내부의 플라스틱 유동은 전단율과 온도에 따라 매우 복잡한 흐름을 보이며, 러너 내부의 전단 가열율은 점도와 전단율 제곱의 곱으로 표현할 수 있다. 또한, 러너 내부 온도는 재료의 열물성, 대류에 의한 열전달 및 전단가열에 의해서 결정된다. 따라서, 온도, 속도 및 점도에 대한 계산이 복잡하기 때문에, 수치 해석적으로 접근할 수밖에 없다.

2.2 센서 및 가변 러너 시스템

Fig. 1에는 실험에 사용된 체적이 다른 두 개의 캐비티 형상을 보여주고 있다. 체적이 큰 제품은 46×24×8mm(L×W×D, volume 1.78cm³)이며, 체적이 작은 제품은 46×24×4mm(L×W×D volume 2.47cm³)이다.

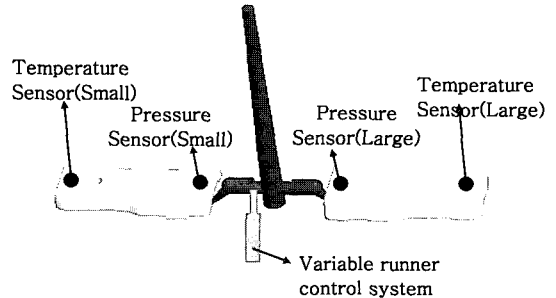


Fig. 1 The shape of the product and sensor positions

사출성형 중의 캐비티 내부 정보를 얻기 위하여 Priamus사의 압력센서(Type 6001B) 및 온도센서(Type 4001A)를 사용하였다. 압력센서는 충전 중에 많은 데이터를 얻을 수 있도록 게이트 근처에 설치 하였으며, 온도 센서는 금형의 표면온도 측정, 수지의 충전현상 감지 및 자동보압절환을 위하여 캐비티의 충전 말단부에 설치하였다.

내부에 충전되는 수지흐름을 제어하기 위하여 Fig. 2와 같이 가변 러너 시스템 중앙에 러너의 단면적을 쉽게 조절할 수 있는 Ø2.5mm의 가변 러너 조절핀을 설치하였다. 가변 러너 조절핀에는 피치(Pitch) 0.6mm의 나사산을 가공하여 회전에 따른 직선운동거리를 쉽게 제어 하고, 단면조절에 따른 변화를 쉽게 계산할 수 있도록 하였다. 가변 러너 조절 핀은 체적이 작은 캐비티의 러너에 위치하였으며, 외부에서 조절하기 위하여 핀의 윗면

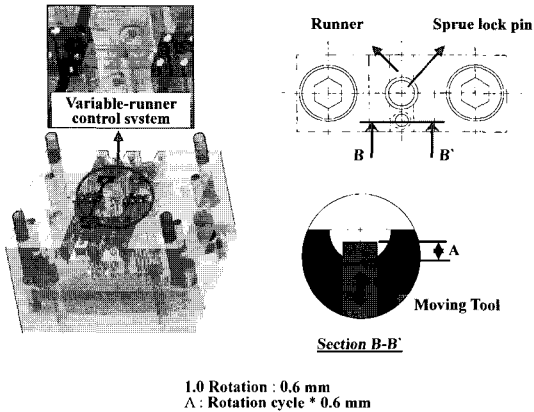


Fig. 2 Drawing of the filling balance tool(Variable-runner system) and installed position in family mold

Table 1 Relationship between number of revolution and the Cross Sectional Area of Runner

Rotation cycle No.	CSAR	Filling Balanced(F.B)		
		LDPE	ABS	PA6,6
Rotation 0	100%			
Rotation 0.5	95.1%			
Rotation 1.0	87.5%			
Rotation 1.5	79.8%			
Rotation 2.0	72.2%			F.B
Rotation 2.5	64.6%			
Rotation 3.0	56.9%		F.B	
Rotation 3.5	49.3%	F.B		
Rotation 4.0	41.6%			

에 홈을 내도록 하였다. 가변러너 조절 핀은 수지 유동방향에 대하여 수직으로 조절되기 때문에 유동 중의 높은 압력에도 핀의 높이 변화는 발생하지 않는다. Table 1에는 단면조절 변화에 따른 러너 감소율을 나타내었다.

2.3 모니터링 장치 및 사출성형기

캐비티 내부의 수지 유동 감지를 위하여 사출성형기의 스크류 전진 시작과 동시에 데이터를 수집하고, 금형이 열리는 시점에 데이터 수집을 종료하게 된다. 사출성형기에서 발생하는 신호는 보압절환 신호 발생과 데이터 수집을 위한 Priamus

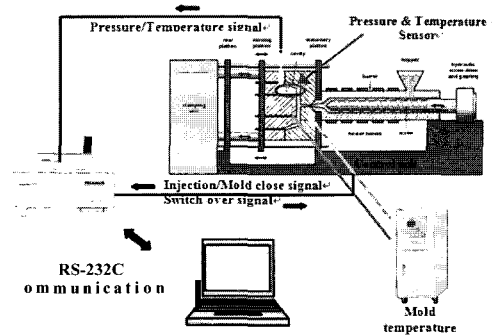


Fig. 3 Schematics of the closed loop control system

Table 2 Injection molding conditions

Factor	Unit	Molding conditions		
		LDPE	ABS	PA6,6
Melt temp.	(°C)	200	220	290
Mold temp.	(°C)	45	60	95
Injection speed	(%)	20/50/70/90		
Hold pressure	(bar)	30	45	30
Holding Time	(sec)	8.0	3.0	4.0
Cooling Time	(sec)	20.0	15.0	12.0

Multi DAQ 장비로 보내진다. 온도센서를 통하여 발생한 신호는 사출성형기의 제어장치로 보내져 자동 보압절환을 일으키며, 결과적으로는 closed-loop 사출 성형이 가능하여 신뢰성 있는 실험 진행을 할 수 있었다. Fig. 3에는 시스템 개념도를 나타내었다. DAQ로 수집된 압력 및 온도 데이터는 RS232C 통신을 통하여 컴퓨터로 보내진다. 실험에 사용된 수지는 LDPE-737(Hanwha), ABS-HI-121H(LG), PA6,6-ZYTEL-101F(DuPont)이다. 사출성형기는 자동보압절환 기능이 적용된 우진 세렉스의 50ton 유압식 사출성형기를 사용하였으며, 성형조건은 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

패밀리 금형의 충전 불균형 실험을 위해서 CAE 해석 및 미성형 실험을 하였다. Fig. 4에 보듯이, ④과 ⑤의 표시된 부분에 충전 불균형이 일어나고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 CAE를 통해서도 확인 할 수 있었다.

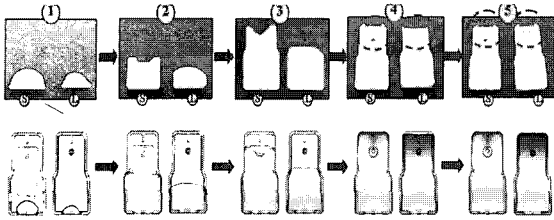


Fig. 4 Short-shot experiment and CAE analysis of the family-mold product using ABS resin

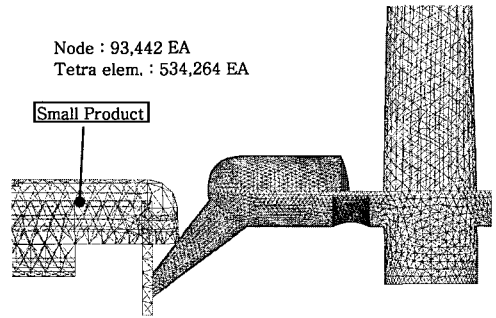


Fig. 5 Detail of view finite element model

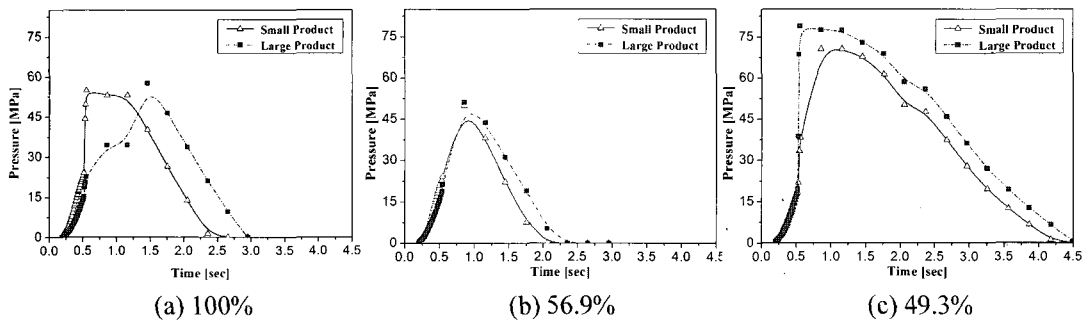


Fig. 6 Pressure profiles according to reduction of cross-sectional area of runner

3.1 사출 성형 CAE 해석

Moldflow 3D를 이용하여 CAE 해석을 수행하였다. 러너 크기의 감소에 따른 수치 유동 상태를 알아보기 위하여 제품과 유동 안내부를 3차원으로 모델링 하였으며, Fig. 5에 나타내었다. 또한 수치적인 에러를 줄이기 위하여 가변러너 조 절부의 유한요소를 조밀하게 형성하였다. 해석에 사용된 성형 조건은 실험과 동일하게 설정하였으며, 보압절환 시점을 캐비티 체적의 100% 위치로 설정하였다. 이것은 CAE 해석에서 충전 불균형 현상을 좀더 효과적으로 판단하기 위함이다. Fig. 6은 러너 크기에 따른 캐비티의 압력 변화 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(a)에는 러너 크기의 감소가 없는 초기 조건으로, 체적이 작은 캐비티에 먼저 수지가 충전되어 보압공정 상태로 들어 섰음을 알 수 있으며, 체적이 큰 캐비티는 충전과정이 계속 진행됨을 압력 데이터를 통하여 확인 할 수 있었다. 러너의 단면 감소가 56.9%일 경우에는 Fig. 6(b)와 같이 두 캐비티의 압력 프로파일이 거의 동일해 짐을 확인하였으며, 이를 통하여 두 캐비티가 충전 균형에 도달 했음을 알 수 있었다. 러너 단면 감소 49.3%의

경우는 체적이 큰 캐비티에 충전이 먼저 이루어 졌다. Fig. 6(c)의 압력 프로파일을 살펴보면, 충전이 완료되는 시점은 거의 동일하지만 체적이 큰 캐비티가 작은 캐비티에 비해 압력이 크게 증가 됨을 확인하였으며, 이를 통하여 충전 불균형이 발생하는 것으로 판단하였다. 러너 단면 감소율이 최대인 41.6%의 CAE 해석에서는 미성형 결과를 나타내었다. 이것은 협소한 러너 유로를 통과하는 수지의 유동 속도가 느려지는 문제로 인하여, 성형품의 충전 완료 전에 러너가 고화되어 나타난 결과로 보여지며, 실제 실험에서는 미성형이 발생하지 않았다. CAE와 실제 실험결과와의 차이는 일반적인 가정을 기본으로 계산되는 수치 해석의 오차로 보여진다.

3.2 온도 변화로 판단한 수지도달시간 측정

실험에서는 Fig. 7에 보듯이, 두 캐비티의 수지도달 감지 시에 발생하는 온도센서 반응시간으로 확인하였다. 초기 조건의 두 캐비티 수지도달 시간 차이는 체적이 작은 캐비티의 충전 감지시간 대비, LDPE의 경우 4.35%, ABS의 경우 4.55%, PA6,6의 경우 2.44%를 차지 하였다. 또한 두 캐비티의 수지 온도 차이는 제품의 두께가 서로 다르며

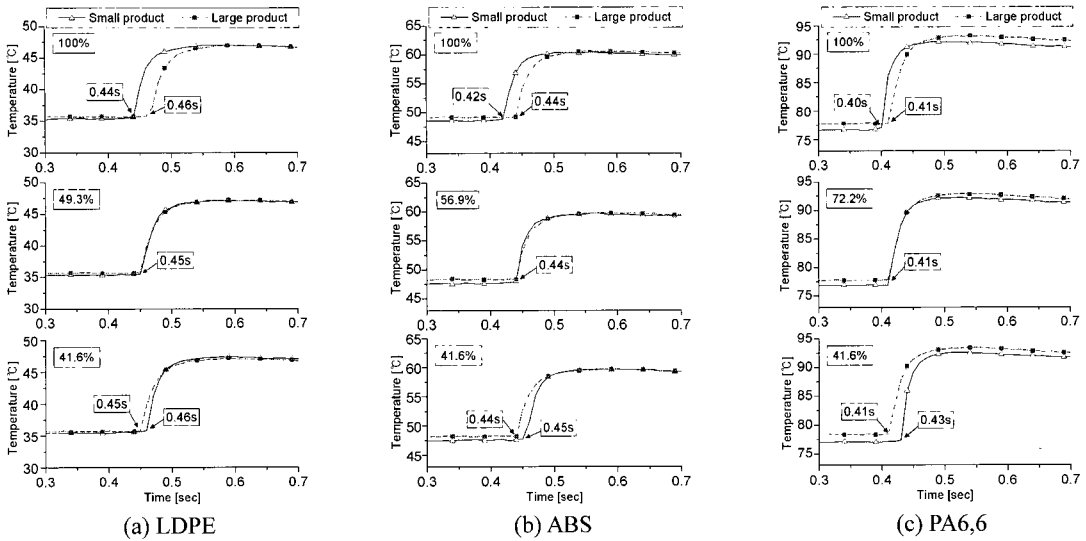


Fig. 7 The resin-arrival time change according to cross-sectional area of the variable runner

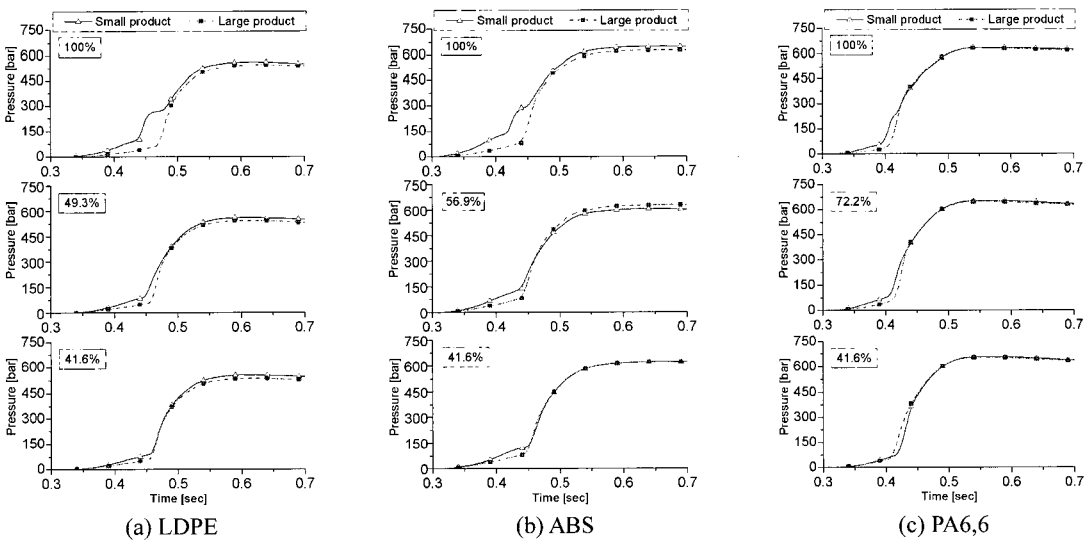


Fig. 8 Cavity pressure curve according to cross-sectional area of the variable runner

냉각채널 위치에도 차이가 있기 때문에 나타난 결과이다. 러너 단면 감소를 통한 두 캐비티의 충전 균형을 위하여 가변러너 조절 핀을 점차 올려서 실험을 진행하였다. LDPE의 경우 러너 단면 감소 49.3%에서 수지도달 시간의 차이가 없는 충전 균형이 이뤄짐을 알 수 있었다. 또한 ABS의 경우에는 러너 단면 감소 56.9%에서, PA6,6의 경우에는 러너 단면 감소 72.2%에서 충전 균형이 이뤄졌다. 충전 균형 상태에서 가변러너 조절 핀을 더 올린 경우에는 수지도달 시간이 역전됨을

확인하였다

3.3 압력변화로 판단한 충전 균형

Fig. 8에서 보듯이 초기 조건에서는 체적이 작은 캐비티가 큰 캐비티 보다 압력이 쉽게 증가하였다. 이러한 캐비티 내부의 압력 변화는 수지 유동 상태를 보여주며, 갑작스런 압력 증가는 캐비티 충전이 완료되어 보압 단계로의 전환을 의미한다. 그러나 실험에서는 체적이 작은 캐비티에 충전이 완료된 뒤에 압력이 빠르게 증가하지 않고 계단

형식으로 증가하는 현상이 관찰되었다. 또한, 체적이 큰 캐비티에 충전이 완료되었을 때 두 캐비티의 압력이 동시에 보압수준으로 빠르게 도달됨을 확인하였다. 이것은 체적이 큰 캐비티가 보압수준에 도달할 때까지 체적이 작은 캐비티에 발생하는 냉각으로 인한 수축량을 원활히 보상해주지 못하여, 성형품의 표면 품질 저하에 원인이 될 수 있다. 충전 균형 조건에서는 계단형의 압력 경향이 나타나지 않았으며, 보압으로 전환될 때의 압력 증가 시간 또한 거의 유사함을 확인하였다. 그러나 보압의 수준에는 약간 차이를 보였으며, 이것은 체적이 작은 캐비티의 러너 크기가 가변러너 조절로 인하여 작아져서 나타난 현상으로 판단된다. 가변러너 조절이 더 진행되었을 때는 캐비티 압력 증가 시기가 역전됨을 확인하였다. 그러나 온도 센서의 수지 도달시간과는 다르게 두 캐비티의 보압절환 시점의 시간 차이를 보이지 않았다. 일반적으로 압력센서는 온도센서보다 반응이 민감하지 않기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

3.4 LDPE/ABS/PA6,6 수지의 충전 균형 시점 차이에 대한 원인 분석

가변러너 조절에 따라 각 수지의 도달시간에 차이가 나타났으며, 수지별로 충전 균형에 도달하는 시점이 다름을 확인하였다. 특히 PA6,6수지 경우는 가변러너 조절량이 다른 수지에 비해서 작을 경우 충전 균형에 이르렀다. 원인을 찾고자 각각의 수지 점도를 비교 분석하였다.

Fig. 9에는 Moldflow 데이터를 이용하여 LDPE/BSA6,6 수지의 전단율과 점도 데이터를 각 공정 온도에서의 점도로 나타내었다. PA6,6 수지의 점도

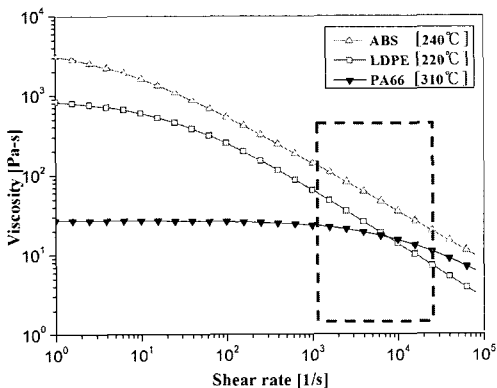


Fig. 9 Viscosity vs. shear rate for LDPE/ABS/PA6,6

가 가장 낮으며 전단율 변화에 둔감함을 확인 할 수 있다. LDPE 수지는 PA6,6 수지와 ABS 수지 사이의 점도를 가지며, LDPE 수지와 ABS 수지는 전단율 변화에 민감함을 알 수 있다. 일반적으로 게이트 부위에서 전단율이 가장 크지만, 가변러너 조절부 또한 조절량이 많아 질수록 러너 단면적이 줄어들어 전단율이 커지고 있음을 CAE해석 결과의 전단율 변화를 통하여 알 수 있었다. 변화 범위는 전단율이 약 1000~25000[1/s] 이었으며, 전단율에 따라 PA6,6의 경우 큰 점도 변화가 없었지만 LDPE와 ABS 수지는 점도가 급격히 변함을 알 수 있었으며, 특히 점도 변화 기울기에 차이가 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 수지의 충전균형 순서와 동일함을 확인할 수 있었다.

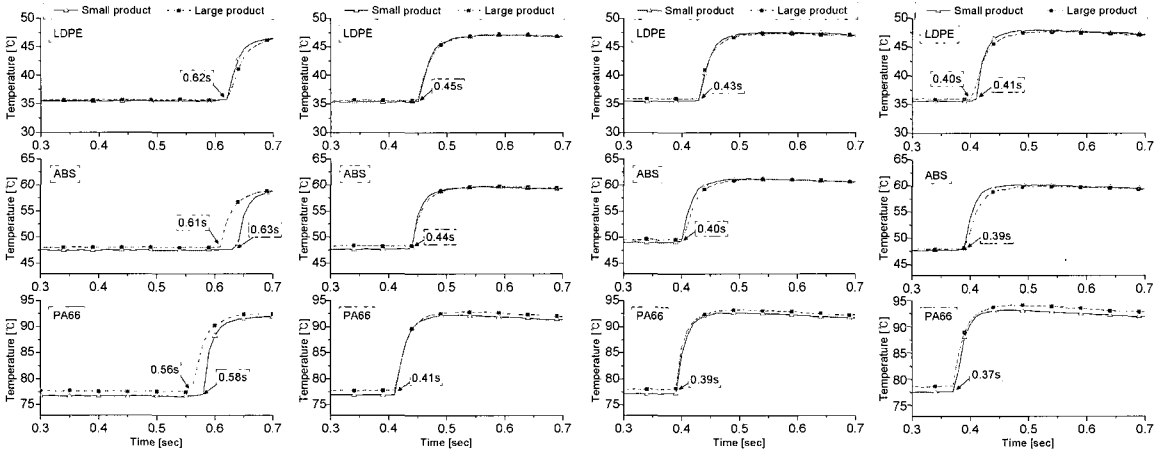
3.5 사출속도의 효과

초기 조건보다 낮은 사출속도에서는 Fig. 10(a)에서와 같이 ABS, PA6,6로 성형된 체적이 큰 캐비티에 먼저 충전이 일어났다. 그러나 LDPE는 낮은 사출속도에서 다른 결과를 보였다. 이것은 ABS와 PA6,6의 경우 낮은 속도에서 체적이 작은 캐비티의 러너에서 유동 저항이 증가되었으며, LDPE의 경우는 증가하지 않았음을 의미한다. 사출속도가 증가함에 따라 두 캐비티의 수지도달 시간은 모두 감소하였지만, 초기 조건 보다 더 빠른 사출속도에서는 수지도달 시간의 차이가 변하지 않았다. 특히 더 높은 사출속도에서의 실험 없이는 충전 순서의 변화를 점성가열효과와 같은 원인으로 결론을 지을 수 없다. 그러나 수지 점도에 영향을 주는 공정변수를 가변러너 시스템의 충전 균형능력에 영향을 주는 요인으로 고려는 해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 가변러너 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템의 충전 균형 능력을 체적이 다른 두 캐비티의 패밀리 금형을 이용하여 실험하였다. 충전 균형은 금형 내에 설치된 압력센서의 압력 프로파일과 온도센서의 수지도달 시간 측정을 통하여 실험 및 분석하였다. 실험을 통하여 충전 균형을 효과적으로 이룰 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 가변러너 시스템의 조절핀의 높이를 조정함에 따라 충전 균형을 이루었다.



(a) Injection speed 20% (b) Injection speed 50% (c) Injection speed 70% (d) Injection speed 90%

Fig.10 The resin-arrival time change according to the injection speed

(2) LDPE의 경우가 러너 단면을 가장 많이 줄였을 때 충전 균형을 이루었으며, PA6,6는 러너 단면을 가장 적게 줄였을 때 충전균형을 이루었다. 이러한 차이는 전단을 변화에 대한 수지 점도의 민감도 영향으로 사료된다.

(3) 충전 균형 이후에 러너 단면을 좀더 줄이면 수지 충전순서가 변화하였으며, 압력센서 보다 온도센서가 충전 균형을 효과적으로 확인할 수 있었다.

(4) 적용된 가변 러너 시스템은 사출속도가 느린 경우에 보다 효과적이며 빠른 경우에는 그 효과가 둔감함을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] J. P. Beaumont, J. H. Young, 1997, Mold filling imbalances in geometrically balanced runner systems, *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 1, No.3, pp. 133~135.
 [2] Y. D. Jeong, 2006, Development of new runner system for filling balance in multi cavity injection mold, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 15, No. 1, p. 42.
 [3] M. Wolbert, B. Zore, 2005, Shear imbalance effects on gas distribution in gas-assist injection molding, *ANTEC2006*, Vol. 3, pp. 3774~3777.
 [4] J. P. Coulter, 2003, Cavity specific control of melt

flow during injection molding processes, *Conference proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Washington, D.C., Vol. 3.

[5] P. Kennedy, 1995, *Flow analysis of injection molds*, Hanser & Gardner Publications Inc., New York, Cincinnati.
 [6] C. Collins, 1999, Monitoring cavity pressure perfects injection molding, *Assembly Automation*, Vol. 19, No. 3, pp. 197~202.
 [7] M. R. Karmal, W. I. Patterson, N. Conley, D. Abu Fara, G. Lohfink, 1987, Dynamics and control of pressure in the injection molding of thermoplastics, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 27, pp. 1403~1410.
 [8] D. Kazmer, P. Barkan, 1997, The process capability of multi-cavity pressure control for the injection molding process, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 37, No. 11, pp. 1880~1891.
 [9] S. Orzechowski, A. Parism, C. Dobbin, 1998, A Process Monitoring and Control System for Injection Molding using Nozzle-based Pressure and Temperature Sensors, *ANTEC98*, Vol. 1, pp. 733~742.
 [10] W. I. Patterson, 1990, Mold temperature measurement and control, *ANTEC90*, pp. 227~232.